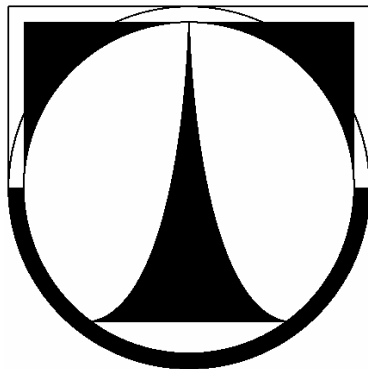


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra materiálů



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2006

Tomáš ŠPÁTA

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

obor 3911R018

MATERIÁLY A TECHNOLOGIE

zaměření:

MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ

KALIBRACE MĚŘENÍ TLOUŤKY VRSTEV NA VODIVÝCH  
PODKLADECH METODOU VÍŘIVÝCH PROUDU

CALIBRATION OF COATING THICKNESS MEASUREMENTS ON  
METALLIC SUBSTRATES BY EDDY CURRENT METHOD

Tomáš ŠPÁTA

KMT-B-118

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Rozsah práce

Rozsah stran: 51

Počet obrázků: 23

Počet tabulek: 14

Počet grafů: 2



## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Jméno a příjmení	<b>Tomáš Š P Á T A</b>
studijní program	<b>B2341 Strojírenství</b>
obor	<b>3911 R 018 Materiály a technologie</b>
zaměření	<b>Materiálové inženýrství</b>

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

### **Kalibrace měření tloušťky vrstev na vodivých podkladech metodou vířivých proudů**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uved'te hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznamte se s principem měření vad, vodivosti a tloušťky vrstev metodou vířivých proudů.
2. Opatřete sadu kalibračních etalonů simulujících posloupnost vrstev od  $L\ 1\mu\text{m}$  do 1mm na feromagnetických a neferomagnetických vodivých podkladech.
3. Realizujte funkční zapojení vířivoproudého snímače.
4. Vypracujte kalibrační závislosti  $L = f(U)$  pro praktické využití.  $U$ ...výstupní napětí snímače ve V.

Forma zpracování bakalářské práce:  
- průvodní zpráva v rozsahu 25 - 40 stran  
- přílohy

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

- [1] Míšek, J., Ptáček, L.. Zkoušení materiálů bez porušení. SNTL Praha 1973.
- [2] ČSN 01 5051. Nedestruktivní zkoušení vířivými proudy – obecné zásady a směrnice.
- [3] ČSN 01 5086. Nedestruktivní zkoušení vířivými proudy – Charakteristiky a ověřování zařízení.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.  
Konzultant bakalářské práce :

L.S.

prof. RNDr. Petr ŠPATENKA, CSc.  
vedoucí katedry

doc. Ing. Petr LOUDA, CSc.  
děkan

V Liberci dne 31.10. 2005

---

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ) .Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.



## **Prohlášení**

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

## **ANOTACE**

Bakalářská práce se zabývá kalibrací diagnostického snímače pro měření tloušťky povlaků na vodivých podkladech metodou vířivých proudů. Práce vyhodnocuje závislost měřené tloušťky povlaku na výstupním napětí diagnostického vířivoproudého snímače a definuje přesné použití snímače.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** vířivé proudy, nedestruktivní testování, povlaky

## **ANNOTATION**

Bachelor work deals with calibration of a diagnostic probe for coating thickness measurement on conductive substrates by eddy currents method. The work evaluates dependence of measured coating thickness on an outgoing electric tension of the eddy current probe and defines exact usage of this diagnostic eddy current probe.

**KEY WORDS:** Eddy Currents, Nondestructive Testing, Coatings

## OBSAH

1 Úvod .....	9
2 Teoretická část .....	10
2.1 Nedestruktivní zkoušky a jejich rozdělení .....	10
2.1.1 Prozařovací zkoušky .....	10
2.1.2 Ultrazvukové zkoušky .....	11
2.1.3 Elektroinduktivní zkoušky .....	11
2.1.4 Magnetoinduktivní .....	11
2.1.5 Kapilární zkoušky .....	11
2.1.6 Vizuální zkoušky .....	12
2.2 Metoda vířivých proudů .....	13
2.2.1 Historie .....	13
2.2.2 Aplikace vířivých proudů .....	14
2.2.3 Základní veličiny a pojmy obvodů s cívkou .....	16
2.2.3.1 Magnetické napětí $F_m$ .....	16
2.2.3.2 Intenzita magnetického pole, $H$ .....	16
2.2.3.3 Celkový magnetický tok, $\Phi$ .....	16
2.2.3.4 Magnetická indukce, $B$ .....	16
2.2.3.5 Indukčnost, $L$ .....	16
2.2.3.6 Magnetická permeabilita, $\mu$ .....	18
2.2.3.7 Impedance, $Z$ .....	18
2.2.3.8 Reaktance, $X_L$ , $X_C$ .....	19
2.3 Princip vířivých proudů .....	20
2.4 Hloubka penetrace a proudová hustota .....	21
3.5.1 Vliv frekvence budícího proudu na měření .....	24
3.5.2 Minimální tloušťka materiálu pro měření vodivosti .....	25
2.5 Impedanční diagram .....	25
2.6 NDT metodou vířivých proudů .....	27
2.6.1 Detekce trhlin .....	27
2.6.2 Měření tloušťky tenkého materiálu .....	27
2.6.3 Měření tloušťky povlaků na vodivých podkladech .....	27
2.6.4 Měření vodivosti .....	29
2.7 Fázové zpoždění .....	29
2.8 Měřicí přístroje .....	30
2.9 Měřicí sondy (snímače) .....	31

2.10 Referenční etalony .....	33
2.11 Přehled norem EN týkajících se vířivých proudů .....	34
3 Praktická část .....	35
3.1 Úvod .....	35
3.2 Přehled použitých přístrojů a pomůcek .....	35
3.2.1 Diagnostický snímač .....	35
3.2.2 Positector 6000FNS1 .....	36
3.2.3 Sonda FN .....	36
3.2.4 Plastové měrky .....	37
3.2.5 Metex M-4650 .....	38
3.3 Funkční zapojení vířivoproudého snímače .....	39
3.3.1 Zapojení snímače se síťovým adaptérem .....	39
3.3.2 Zapojení snímače s napájecím modulem .....	40
3.4 Kalibrace snímače pro měření nevodivých povlaků .....	41
3.4.1 Postup měření .....	41
3.4.2 Naměřené hodnoty .....	41
3.4.3 Vyhodnocení naměřených hodnot .....	43
3.4.4 Postup při měření nevodivých povlaků .....	43
3.5 Kalibrace snímače pro měření vodivých povlaků .....	46
3.5.1 Postup měření .....	46
3.5.2 Naměřené hodnoty .....	46
3.5.3 Vyhodnocení naměřených hodnot .....	49
4 Diskuze .....	49
5 Závěr .....	50
6 Použitá literatura .....	51

# 1 Úvod

**Teoretická část** bakalářské práce zahrnuje přehled základních metod nedestruktivního testování materiálu ve strojírenství. Seznamuje s principem měření vad, vodivosti a tloušťky povlakových vrstev na vodivých materiálech metodou vířivých proudů.

**V praktické části** je realizováno funkční zapojení vířivoproudého snímače firmy STARMANS k měření povlakových vrstev, ke kterému není k dispozici originální měřicí přístroj. Je zde vypracována kalibrační závislost výstupního napětí snímače na měřené tloušťce povlaku pro praktické využití snímače a rozhodnutí o vhodnosti použití snímače k měření vodivých a nevodivých vrstev na vodivém podkladovém materiálu.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Nedestruktivní metody testování a jejich rozdělení

Účelem nedestruktivních zkoušek je především zjišťování povrchových, podpovrchových a vnitřních vad materiálu bez jeho porušení. Význam nedestruktivních zkoušek stoupá zejména v poslední době převážně při posuzování bezpečnosti, provozní spolehlivosti a životnosti výrobku (například ve strojírenství, chemickém a automobilovém průmyslu, ...).

Před provedením defektoskopické zkoušky je třeba uvážit, jaký druhy vady a v které oblasti se v materiálu může vyskytovat. Podle těchto předpokladů se poté volí druh zkoušky. Některé typy vad lze totiž zjistit pouze určitým druhem zkoušky. Často se proto kombinuje několik různých zkoušek. [2]

U některých specifických součástí se bez defektoskopických zkoušek nelze obejít. Jedná se především o kontrolu vysoce namáhaných součástí jako např. tlakové nádoby, části turbín, lodní šrouby, ..., kde by byla destruktivní zkouška velmi nákladná nebo zcela neproveditelná.

Součásti se kontrolují v průběhu výrobního procesu i během používání. Některé defektoskopické zkoušky lze poměrně snadno automatizovat. [1, 2]

#### 2.1.1 Prozařovací zkoušky - používají se pro zjišťování vnitřních vad materiálu.

Využívá se principu průchodu vysokoenergetického záření zkoušeným materiálem. Zkouší se především svary a odlitky. Záření vycházející ze zdroje prochází zkoušeným předmětem a dopadá na detektor. Pokud projde záření nějakou vadou, sníží se jeho intenzita závisící na kvalitě a tloušťce materiálu. Záření dopadá na detektor, kde je jeho intenzita zaznamenána na film nebo zobrazovací zařízení (monitor). Využívá se RTG záření nebo  $\gamma$  záření. Ocel lze RTG zářením zkoumat až do tloušťky 100mm,  $\gamma$  zářením do tloušťky 180 mm. Při této kontrole je nutno zajistit bezpečnostní pravidla ochrany před nebezpečnými účinky ionizujícího záření na lidský organismus. Proto se tato zkouška smí provádět pouze v uzavřených komorách a patří k nejnáročnějším. [1]

**2.1.2 Ultrazvukové zkoušky** - používají se pro zjišťování vnitřních vad materiálu, ale také pro zjišťování mechanických a fyzikálních vlastností materiálu, k posouzení struktury a složení, k měření rozměrů. Využívá se principu šíření a odrazu ultrazvukového vlnění ve zkoušeném materiálu. Při průchodu vlnění přes plochu vady dojde k jeho odrazu. Používá se metody průchodová a odrazová. Patří mezi nejpoužívanější defektoskopické zkoušky. [1]

**2.1.3 Elektroinduktivní zkoušky** - používají se pro zjišťování povrchových a těsně podpovrchových vad materiálu. K indikaci vad se využívá principu vířivých proudů indukovaných ve zkoušeném materiálu. Vada je indikována změnou výsledného magnetického pole. Tato změna magnetického pole je zaznamenávána pomocí snímacích cívek a následně je zobrazována na měřicím přístroji. Lze zkoušet pouze elektricky vodivé materiály, na rozdíl od magnetoinduktivní metody ale nemusí být feromagnetické. Tato metoda lze snadno automatizovat. [1,2]

**2.1.4 Magnetoinduktivní** - používají se pro zjišťování povrchových a těsně podpovrchových vad materiálu. K indikaci vad se využívá magnetické pole procházející zkoušeným předmětem. V místě vady dochází ke zvětšení magnetického odporu a ke vzniku rozptylového magnetického pole. K detekci vady se často používá feromagnetický prášek, který se po zmagnetování soustředí v místě, kde se vykytuje vada. Feromagnetický prášek mívá stejnou barvu jako materiál a opadáva na šikmých plochách, proto se mísí s petrolejem. Lze použít pouze u feromagnetického materiálu. Nevýhodou je, že po zkoušce musí následovat odmaštění a odmagnetování v odmagnetovacích tunelech, při optimálních podmínkách může být odhalena trhlina o šířce 0,002 mm. [1]

**2.1.5 Kapilární zkoušky** – používají se pro zjišťování povrchových necelistvostí materiálu a netěsností výrobku. Při této zkoušce se využívá vhodná kapilárně aktivní barevná nebo fluorescenční kapalina. Tato kapalina se vhodně nanese na povrch materiálu, kde pronikne do povrchových trhlin. Po odstranění (setření) přebytečné kapaliny z povrchu zkoušeného materiálu se nanese na povrch vývojka, do které se kapalina z trhlinek navztlíná vlivem

kapilárních sil. Nelze zjišťovat přesnou velikost trhlín, pouze jejich polohu a množství. Předpokladem je použití barevně kontrastní detekční kapaliny a vývojky a jakostní, dokonale odmaštěný a suchý povrch. Při této zkoušce lze dosáhnout velmi dobrých výsledků, při optimálních podmínkách může být odhalena trhlina o šířce 0,001 mm. [1]

**2.1.6 Vizuální zkoušky** – používají se pro zjišťování zjevných povrchových vad svarů, odlitků nebo výkovků. Zjišťují se i usazeniny a koroze. V současnosti se tato zkouška díky své účinnosti zařadila mezi ostatní standardní metody zkoušení a nadále nabývá na významu. [1]

- **přímé** – jedná se o pečlivou prohlídku zrakem, příp.lupou (zvětšení 3x až 6x)
- **nepřímé** – provádí se za pomoci speciálních přístrojů (endoskopů – Obr.1. a Obr.2.), především k prohlídce špatně přístupných povrchů (vady vnitřních povrchů trubek, nádrže, kotle).



*Obr.1. Průmyslový endoskop*



*Obr.2.. Prohlídka trubky o Ø15mm průmyslovým endoskopem*



## 2.2 Metoda vířivých proudů

Metoda vířivých proudů je vhodná k lokalizaci povrchových i podpovrchových vad, měření elektrické vodivosti, magnetické permeability, tloušťky tenkého materiálu a tloušťky povlaků na vodivých podkladech.

Vířivé proudy jsou způsobené primárním magnetickým polem generovaným vířivoproudým snímačem. Tyto proudy vyvolávají sekundární elektromagnetické pole, které opětovně zachytává a vyhodnocuje detektor kovů. [2]

### 2.2.1 Historie

Zkoušení metodou vířivých proudů má své počátky v objevu elektro-magnetické indukce Michaelm Faradayem roku 1831. Faraday byl profesorem chemie Královské vojenské akademii ve Woolwichi v Anglii počátkem 19.století. Je mu přičítán objev elektromagnetické indukce, elektromagnetické rotace (princip elektromotoru), magneto-optického jevu (magnetické stáčení polarizační roviny), diamagnetismu, a dalších jevů. Roku 1879 popsal další vědec David Edward Hughes změny ve vlastnostech cívky umístěné do kontaktu s kovy o různé vodivosti a permeabilitě. Elektromagnetickou indukci později zkoumal i petrohradský akademik Heinrich Friedrich Emil Lenz a roku 1834 dospěl k závěru, že „... *při indukci elektromagnetické indukovaný proud vždy jest takového směru, že zabraňuje změně, kterou indukce vzniká.*„ Takto formulovaný poznatek je označován jako Lenzův zákon. Vyjadřuje jakousi setrvačnost vzájemného stavu mezi magnetickým polem a vodičem vedoucím proud. [2, 5]

Jeden z experimentálních důkazů platnosti Lenzova zákona podal o dvacet let později proslulý francouzský fyzik Jean Bernard Léon Foucault. Pro demonstraci přeměny mechanické práce v teplo použil kruhovou měděnou desku umístěnou mezi póly elektromagnetu. Desku nechal kmitat vodorovnými torzními pohyby. Elektromagnetickou indukcí vznikaly v desce elektrické proudy směřující podél poloměrů ke středu nebo od středu desky. Podle Lenzova zákona působily svými silovými účinky vždy proti pohybu desky. Indukované proudy byly nazvány vířivé proudy nebo též Foucaultovy proudy. [5]

K praktickému využití vířivých proudů k testování materiálu došlo až v období 2.světové války. Mnoho úsilí bylo v tomto směru vykonáno v 50. a 60. letech 20.století, zejména v leteckém a atomovém průmyslu. V současné době je testování metodou vířivých proudů široce uplatňováno v nejrůznějších odvětvích lidské činnosti. [2]

## 2.2.2 Aplikace metody vířivých proudů

Testování pomocí vířivých proudů je využíváno v nejrůznějších průmyslových odvětvích především k zjišťování vad materiálu a jeho měření. Hlavním účelem vířivých proudů je zjišťování vad, pokud známe jejich povahu. Obvykle se tato metoda používá k vyšetřování poměrně malé oblasti materiálu. Konstrukční typ sondy a testovací parametry musí odpovídat podstatě vady, kterou chceme zjišťovat. Vířivé proudy se soustřeďují na povrchu zkoušeného materiálu a složí tedy ke zjišťování povrchových a těsně podpovrchových vad. [2]

U tenkých materiálů, jako jsou například trubky a plechy, mohou být vířivé proudy použity k měření tloušťky materiálu. Tento typ měření se tak například úspěšně používá při měření ztenčení materiálu způsobeném korozí. Využívá se například v leteckém průmyslu ke kontrole opláštění letadel. Vířivými proudy lze také zjišťovat tloušťku nátěrů nebo jiných povlaků. [2]

Vířivé proudy jsou ovlivňovány elektrickou vodivostí a magnetickou permeabilitou materiálu. To nám umožňuje zjistit o materiálu mnoho užitečných informací o jeho zpracování, například zda-li byl vystaven vysokým teplotám nebo byl tepelně zpracován, neboť tyto procesy ovlivňují vodivost materiálu.

Vybavení a sondy jsou k dostání v širokém škále variant a provedení. Přístroje pro měření metodou vířivých proudů jsou v současnosti vyráběny jako malé, bateriové jednotky pro snadnou manipulaci. Pracují s počítačově založenými systémy, které umožňují snadný přenos dat do laboratoře. Software zpracovávající signál je schopný odstraňovat ze signálu šum a další nežádoucí jevy. Některé laboratoře mají víceúrovňové jednotky k tvorbě obrazů celých zkoumaných oblastí. Několik přenosných vyhodnocovacích systémů existuje také pro speciální aplikace, jako například scanování celých oblastí trupů letadel. [2]

Jednou z hlavních výhod vířivých proudů jako metody nedestruktivního testování (NDT) je vysoká univerzálnost kontroly a měření.

**Vířivé proudy mohou být za příznivých okolností použity k:**

- Detekce trhlin
- Měření tloušťky tenkého materiálu
- Detekce ztenčování kovu vlivem koroze nebo mech. opotřebení
- Stanovení tloušťky povlaků na vodivých podkladech

- Měření průřezu válcovitých trubek a tyčí
- Měření magnetické permeability
- Měření vodivosti k:
  - identifikaci materiálu
  - vyhodnocování tepelného ovlivnění
  - vyhodnocování tepelného zpracování

### **Výhody vířivých proudů:**

- Citlivost na malé trhliny a jiné defekty
- Detekce povrchových a těsně podpovrchových vad
- Detekce trhlín pod vrstvou např. barvy
- Měření poskytuje okamžité výsledky
- Přenosné vybavení (přístroje, sondy)
- Metoda může být použita kromě zjišťování trhlín i k dalším měřením
- Minimální nároky na úpravu povrchu
- Testovací sonda nevyžaduje přímý kontakt s materiálem
- Vyšetřování složitých tvarů a rozměrů
- Všechny druhy vodivých materiálů
- Vysoká rychlost testování (až 5m/s)

### **Některá omezení vířivých proudů:**

- Pouze pro vodivé materiály
- Povrch materiálu musí být pro sondu snadno přístupný
- Nutné větší zkušenosti a proškolení než u jiných metod
- Výsledky jsou ovlivněny úpravou povrchu a drsností
- Potřeba seřízení přístroje pomocí etalonu
- Omezená hloubka penetrace
- Nelze zjistit vady, které jsou rovnoběžné s vinutím cívky v sondě

## 2.2.3 Základní veličiny a pojmy obvodů s cívkou [6]

### 2.2.3.1 Magnetické napětí, $F_m$ – v praxi se $F_m$ určuje v ampér závitech [Az]

$$F_m = I \cdot N \quad [A; A; -] \quad (1)$$

kde:  $I$  ... proud protékající cívkou [A]

$N$  ... počet závitů cívky [-]

### 2.2.3.2 Intenzita magnetického pole, $H$ – magnetické napětí vztažené na jednotku siločáry.

$$H = \frac{F_m}{l_s} = \frac{I \cdot N}{l_s} \quad [A \cdot m^{-1}; A; -; m] \quad (2)$$

kde:  $F_m$  ... magnetické napětí [A]

$N$  ... počet závitů cívky [-]

$l_s$  ... délka střední siločáry [m]

### 2.2.3.3 Celkový magnetický tok, $\Phi$ – v podstatě počet všech siločar, které vyvolá cívka.

$$\Phi \quad \dots \quad 1 \text{ Weber} \quad \dots \quad [Wb]$$

### 2.2.3.4 Magnetická indukce $B$ – magnetický tok (počet siločar), které projdou jednotkou plochy kolmou na směr siločar.

$$B \quad \dots \quad 1 \text{ Tesla} \quad \dots \quad [T]$$

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad [T; Wb; m^2] \quad (3)$$

kde:  $\Phi$  ... celkový magnetický tok [Wb]

$S$  ... plocha, kterou prochází mag. siločáry [ $m^2$ ]

### 2.2.3.5 Indukčnost, $L$

Indukčnost je fyzikální veličina, vyjadřující velikost magnetického indukčního toku kolem cívky při jednotkovém elektrickém proudu (1 A) procházejícím

cívkou. Vyjadřuje schopnost cívky změnit elektrickou energii na energii magnetického pole. Čím větší je indukčnost cívky, tím silnější magnetické pole kolem cívky vznikne při stejné velikosti elektrického proudu procházejícího cívkou. Indukčnost závisí na počtu závitů cívky, délce cívky a použití jádra (při použití jádra se indukčnost zvětší)

$L$  .... 1 Henry ... [H]

• **výpočet indukčnosti z definice:**

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad [\text{H}; \text{Wb}; \text{m}] \quad (4)$$

kde:  $\Phi$  ... magnetický indukční tok [Wb]

$I$  ... elektrický proud [A]

• **výpočet indukčnosti z geometrických vlastností cívky:**

$$L = \mu \cdot N^2 \cdot l \cdot S \quad (5)$$

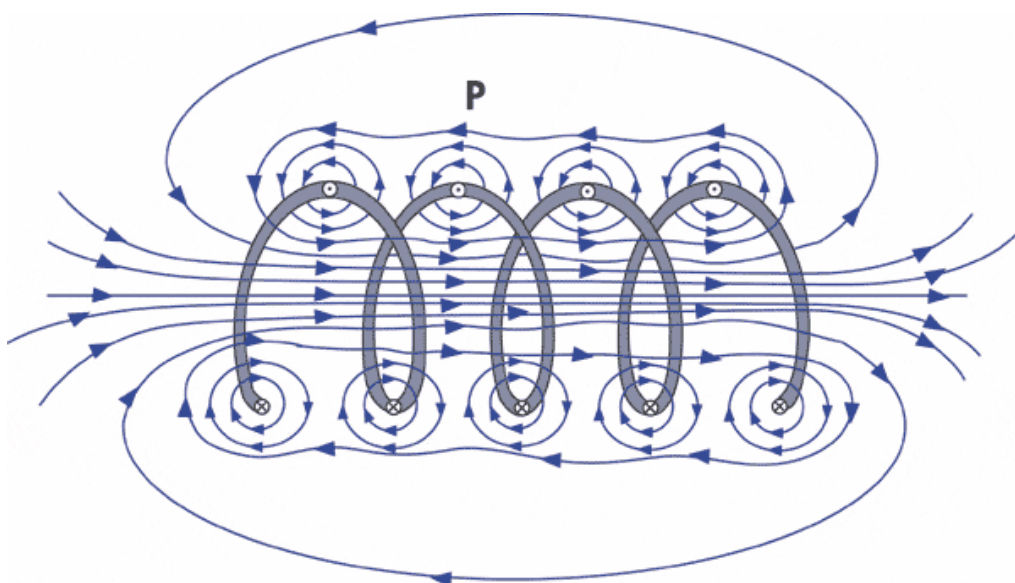
kde:  $\mu$  ... permeabilita prostředí [ $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ ]

$N$  ... počet závitů cívky na jednotku délky

$l$  ... délka cívky [mm]

$S$  ... obsah průřezu vodiče [ $\text{mm}^2$ ]

Pozn.: vztah platí pro cívku, jejíž délka je mnohem větší než poloměr (solenoid), při zanedbání rozptylu magnetického pole na krajích cívky.



Obr.3. Rozložení magnetického pole v cívce

### 2.2.3.6 Magnetická permeabilita, $\mu$

Konstanta  $\mu$  uvedená ve vzorcích se nazývá magnetická permeabilita prostředí a charakterizuje magnetické vlastnosti prostředí.

Základní permeabilita je permeabilita vakua  $\mu_0 = 1,256\ 637 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ . Při porovnání s permeabilitou daného prostředí  $\mu$  s ní získáme relativní permeabilitu  $\mu_r$ . Hodnoty *relativní permeability* závisí na čistotě materiálu. [7]

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad [-; \text{H} \cdot \text{m}^{-1}; \text{H} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (6)$$

Tab.1. Relativní permeabilita vybraných látek

Látka	$\mu_r$
<b>Paramagnetické látky</b>	
Hliník	1,000 023
Kyslík kapalný (O <sub>2</sub> )	1,003 620
Kyslík plyný (O <sub>2</sub> )	1,000 001 86
Platina	1,000 264
<b>Diamagnetické látky</b>	
Bizmut	0,999 848
Kuchyňská sůl	0,999 984 1
Měď	0,999 990
Voda	0,999 991
<b>Feromagnetické látky</b>	
Čisté železo	6000
Ocel	8000
Magneticky měkké ferity	> 10 000
Železo legované niklem	do 300 000

### 2.2.3.7 Impedance, $Z$

Elektrická impedance je celkový odpor, který obvod klade průchodu střídavého proudu. Jednotkou impedance je  $\Omega$ . Impedance má složku reálnou (odpor  $R$ ) a složku imaginární (induktivní reaktance  $X_L$  a kapacitní reaktance  $X_C$ ). Impedance popisuje zdánlivý odpor součástky a fázový posuv napětí proti proudu při průchodu harmonického střídavého elektrického proudu dané frekvence. Impedance charakterizuje vlastnosti prvku pro střídavý proud. Obvody vířivých prvků obsahují zpravidla jen RL prvky.

$$\text{komplexní zápis} \quad Z = R + jX \quad (7)$$

$$\text{skalární zápis} \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (8)$$

$$\text{polární zápis} \quad Z = |Z| \cdot e^{j\varphi} \quad (9)$$

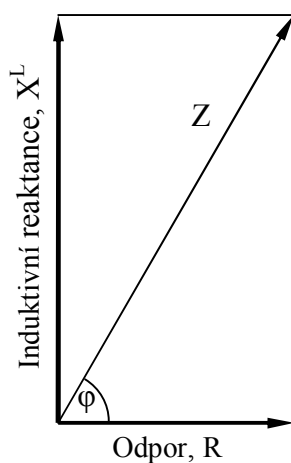
S impedancí se formálně počítá stejně jako s odporem, platí zde stejná pravidla pro sériové a paralelní řazení, pouze místo okamžitých hodnot napětí a proudů pracujeme s fázory.

### 2.2.3.8 Reaktance, $X_L$ , $X_C$

Reaktance je imaginární částí impedance součástky. Reaktance indukčního charakteru se nazývá indukance, reaktance kapacitního charakteru je kapacitance. Rezistor nevykazuje žádnou reaktanci.

$$\text{Indukční reaktance (induktance)} \quad X_L = \omega \cdot L \quad [\Omega; \text{s}^{-1}; \text{H}] \quad (10)$$

$$\text{Kapacitní reaktance (kapacitance)} \quad X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad [\Omega; \text{s}^{-1}; \text{F}] \quad (11)$$



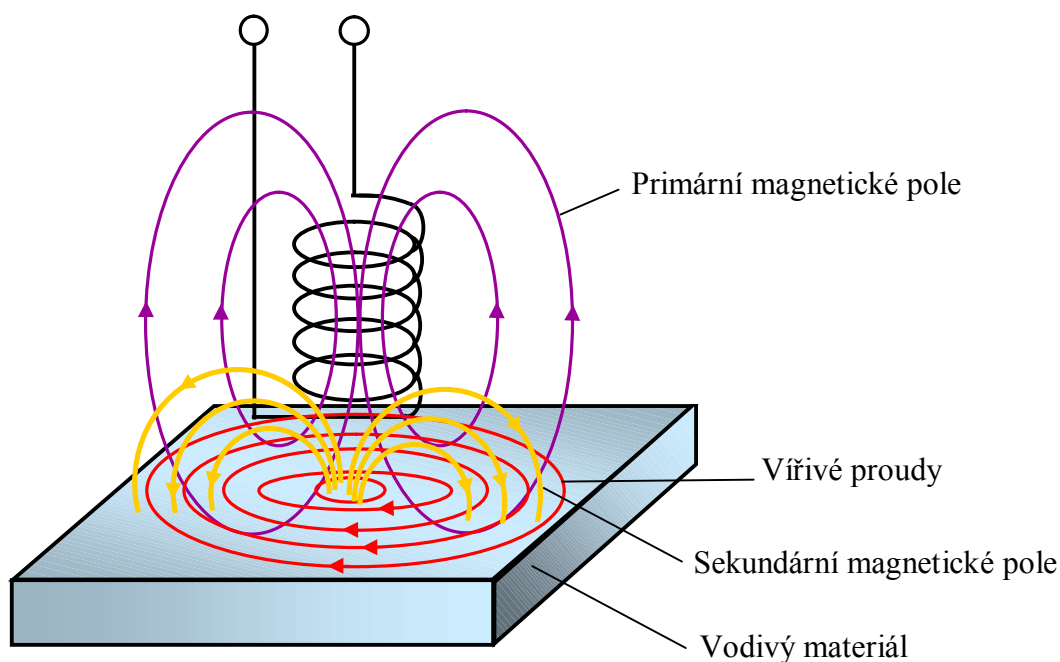
Obr.4. Grafické znázornění impedance

$$\text{fázový úhel } \varphi: \quad \varphi = \arctan \frac{X_L}{R} \quad (12)$$

## 2.3 Princip vířivých proudů

Pokud zapojíme cívku do obvodu střídavého proudu, tak vzniká kolem cívky proměnné magnetické pole (*Ampérův zákon*). Provedeme-li cívku s určitým počtem závitů, můžeme získat magnetické pole libovolně silné. Síla magnetického pole závisí na počtu závitů a proudu protékajícím v cívce. Když cívku (snámač) přiblížíme k vodivému materiálu (Fe, Al), tak začne proměnné magnetické pole  $B(t)$  cívky vytvářet uvnitř plného vodivého materiálu vírové elektrické pole, které vyvolává ve vodiči uzavřené proudové smyčky kolmé k magnetickému toku (*Faradayův zákon*). [3] Tyto proudy se nazývají vířivé proudy (Foucaultovy prudy). Podle Lenzova pravidla mají tyto proudy takový směr, že svými účinky brání změnám, které je vyvolaly. [2,3]

Vířivé proudy vytváří vlastní magnetické pole, které působí v protisměru k magnetickému poli cívky (*Lenzův zákon*). Porovnáním změn v odporu kladeném vířivým proudům a impedanci cívky můžeme sledovat charakter zkoušeného materiálu. Můžeme tak například zjišťovat elektrickou vodivost a magnetickou permeabilitu materiálu (lze tak rozlišit o jaký materiál se jedná) a stav materiálu (např. trhliny). Vzdálenost cívky od vodivého materiálu ovlivní vzájemný indukční odpor okruhu. Tohoto jevu se využívá pro měření tloušťky nevodivé vrstvy materiálu na elektricky vodivých podkladech. Vířivé proudy se soustředí blízko povrchu a jejich síla se snižuje s vzdáleností od cívky. Vrstva povlaku udržuje cívku v určité vzdálenosti odpovídající tloušťce tohoto povlaku. Ze vzájemného indukčního odporu tedy lze stanovit tloušťku povlaku. [2]



Obr.5. Vznik vířivých proudů

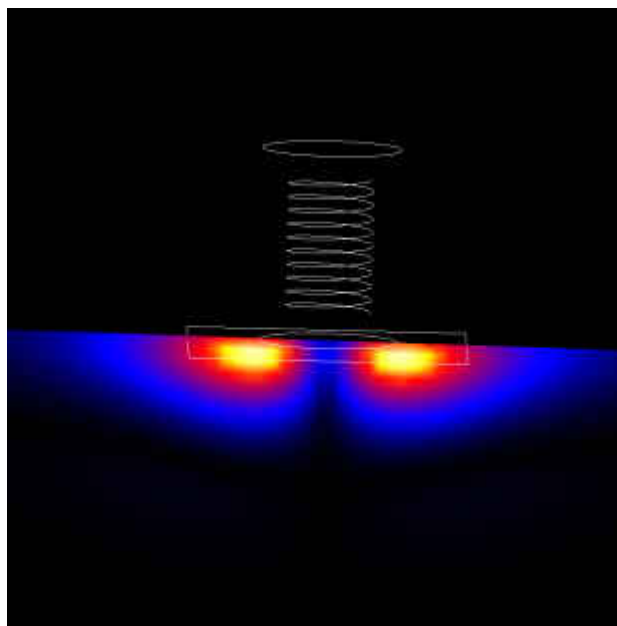


## 2.4 Hloubka penetrace a proudová hustota

Vířivé proudy jsou uzavřené smyčky indukovaného proudu obíhající po kruhových drahách v rovinnách kolmých k magnetickému toku. Obvykle se pohybují rovnoběžně s vinutím cívky a jejich tok je omezován velikostí indukovaného magnetického pole. Vířivé proudy se soustředí k povrchu nad kterým se nachází cívka. Tento jev je známý jako povrchový jev (skin efekt). Intenzita vířivých proudů se snižuje s rostoucí vzdáleností od cívky (jak je znázorněno na Obr.7.). Hustota vířivých proudů se snižuje exponenciálně s hloubkou.

Povrchový jev nastává, když vířivé proudy protékající zkušebním materiálem a v libovolné hloubce materiálu vytvářejí magnetické pole, které působí proti primárnímu magnetickému poli sondy a tím dochází ke snížení čistého magnetického toku. To způsobuje snížení toku proudu se vzrůstající hloubkou. Eventuelně, vířivé proudy blízko povrchu mohou být viděny jako stínění magnetické pole cívky, čímž oslabují magnetické pole ve větších hloubkách a zmenšují indukované proudy. [2]

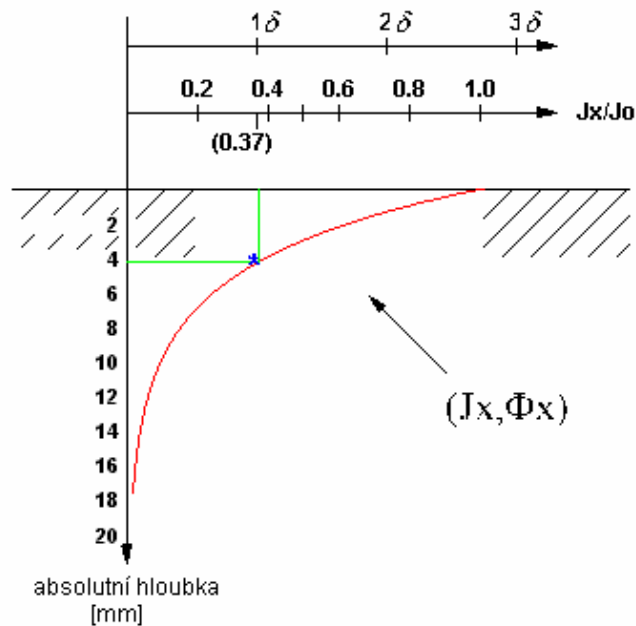
Hloubka do které vířivé proudy v materiálu proniknou závisí na frekvenci budícího proudu, elektrické vodivosti a magnetické permeabilitě materiálu. Hloubka penetrace klesá s rostoucí frekvencí, rostoucí vodivostí a rostoucí magnetickou permeabilitou (viz. Obr.7). Hloubka, ve které se hustota vířivých proudů snížila na hodnotu  $1/e$ , neboli na 36% proudové hustoty na povrchu, se nazývá standardní hloubka penetrace ( $\delta$ ). Ačkoliv vířivé proudy proniknou hlouběji než je jedna standardní hloubka penetrace, jejich hustota se velmi rychle s hloubkou snižuje. Ve dvou standardních hloubkách penetrace ( $2\delta$ ), se hustota vířivých proudů snížila na hodnotu  $(1/e)^2$ , neboli 13,5%, povrchové hustoty. Ve třech standardních hloubkách ( $3\delta$ ) má hustota vířivých proudů hodnotu pouhých 5% povrchové hustoty. Velikost standardní hloubky penetrace určuje vztah (13), vztah mezi proudovou hustotou na povrchu a uvnitř materiálu je zřejmý ze vztahu (14). [2,9]



Obr.6. Pole vířivých proudů

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} \quad (13)$$

kde:	$\delta$	...	standartní hloubka penetrace	[mm]
	$f$	...	testovací frekvence	[Hz]
	$\mu_0$	...	permeabilita vakua	[H·mm <sup>-1</sup> ]
	$\mu_r$	...	permeabilita	[H·mm <sup>-1</sup> ]
	$\sigma$	...	elektrická vodivost	[S]



Obr. 7. Hustota vířivých proudů v hliníku při frekvenci budícího proudu 200Hz

$$J_x = J_0 \cdot e^{\frac{-x}{\delta}} \quad (14)$$

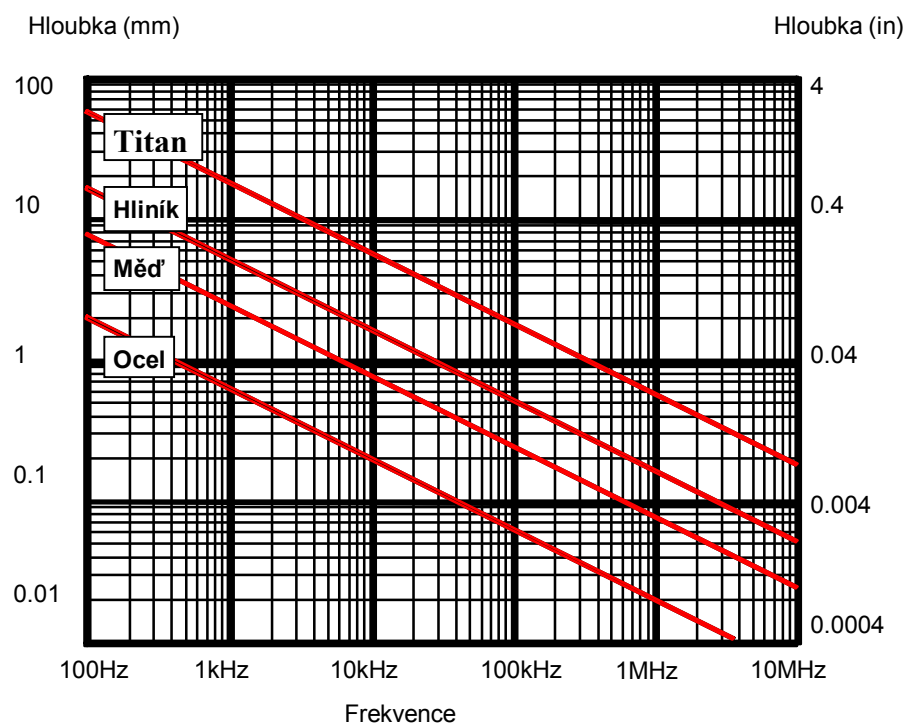
kde:  $J_x$  ... proudová hustota [A·m<sup>2</sup>]

$J_0$  ... proudová hustota na povrchu [A·m<sup>2</sup>]

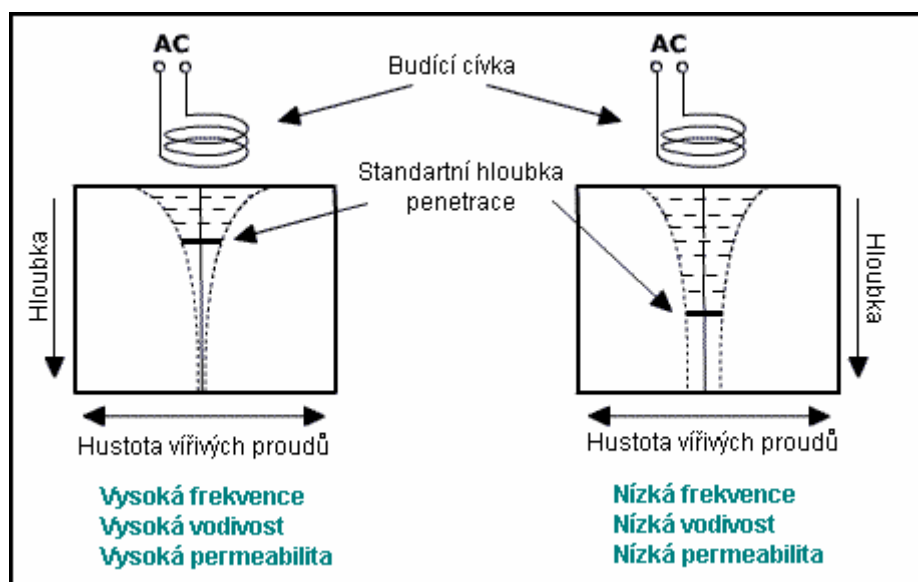
$x$  ... hloubka pod povrchem

$\delta$  ... standardní hloubka penetrace

$e$  ... Eulerovo číslo = 2,71828



Obr8.. Vliv frekvence budícího proudu a materiálu na hloubku penetrace



Obr.9. Vliv budící frekvence, vodivosti a permeability na hloubku penetrace

#### 2.4.1 Vliv frekvence budícího proudu na citlivost měření

Citlivost měření závisí na hustotě vířivých proudů v zkoumané oblasti. Proto je užitečné znát v tomto místě jejich intenzitu.

Frekvence střídavého proudu je nastavena tak, aby se předpokládaný defekt nacházel v hloubce nepřekračující jednu standardní hloubku penetrace. Tím zaručíme, že vířivé proudy poslouží k přesné identifikaci takového defektu. Naopak, pokud použijeme vířivých proudů k měření elektrické vodivosti materiálu, frekvence je nastavena tak, aby se ve zkoušeném materiálu indukovaly vířivé proudy do tří standardních hloubek. To je důležité zejména proto, že při malé tloušťce materiálu by mohlo dojít k ovlivnění vířivých proudů prostředím nacházejícím se za materiálem. Při měření tloušťky povlaků by měla být volena co největší možná budicí frekvence, aby se minimalizoval vliv podkladového materiálu. [2]

Tab.2. 3standardní hloubky penetrace některých materiálů při budicí frekvenci 1MHz

Neferomagnetické materiály	
materiál	$3\delta$
Stříbro	0,19 mm
Měď	0,20 mm
Zlato	0,22 mm
Hliník	0,24 mm
Zinek	0,37 mm
Olovo	0,69
Mosaz	1,59 mm
Feromagnetické materiály	
materiál	$3\delta$
Níkl	0,04 mm
Nerez ocel	0,08 mm
Železo	0,59 mm

Tab.3. Vztah mezi standardní hloubkou penetrace a fázovým úhlem signálu

Hloubka penetrace	Poměrná hustota vířivých proudů	Fázové zpoždění
0 $\delta$	$e^0 = 100\%$	0 rad = $0^\circ$
1 $\delta$	$e^{-1} = 37\%$	1 rad = $57.3^\circ$
2 $\delta$	$e^{-2} = 14\%$	2 rad = $114.6^\circ$
3 $\delta$	$e^{-3} = 5\%$	3 rad = $171.9^\circ$
4 $\delta$	$e^{-4} = 2\%$	4 rad = $229.2^\circ$
5 $\delta$	$e^{-5} = 0.7\%$	5 rad = $286.5^\circ$

#### 2.4.2. Minimální tloušťka materiálu pro měření vodivosti

Při měření vodivosti má být tloušťka materiálu alespoň 3 standardní hloubky penetrace kvůli zamezení vedlejších efektů způsobených prostředím za materiálem. [2]

$$t \geq 3\delta \quad (15)$$

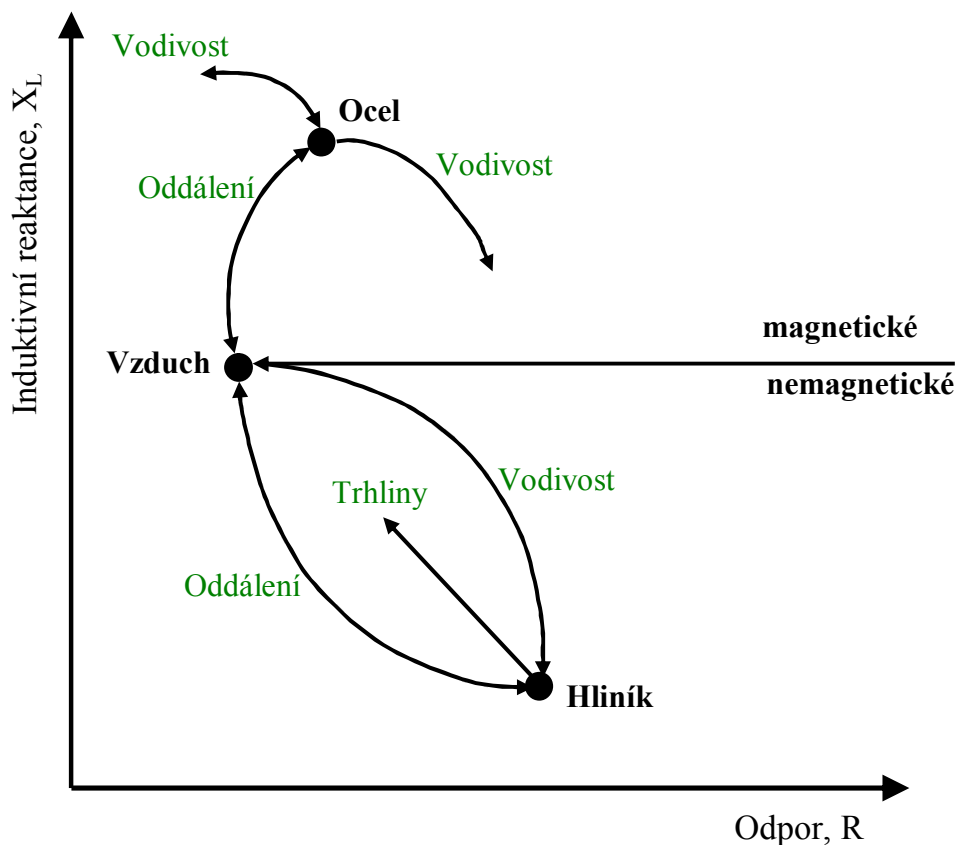
kde:

t ... tloušťka materiálu

$\delta$  ... standardní hloubka penetrace

## 2.5 Impedanční diagram

Impedanční diagram (Obr.9.) nám slouží k zobrazení důležitých informací o vířivých proudech. Na vodorovnou osu x se vynáší odpor komponent, neboli celkový odpor, který klade zkoušený materiál vířivým proudům. Na svislou osu y se vynáší induktivní reaktance výsledného magnetického pole, které detekuje vířivoproudý snímač. Intenzita vířivých proudů a permeabilita zkoušeného materiálu způsobuje v impedančním diagramu změnu výstupního signálu různým způsobem. [2]



Obr.9. Impedanční diagram

Pokud je obvod vířivého proudu vyvážený na vzduchu a poté přiložíme sondu na nemagnetický vodivý materiál, jako např. hliník, odpor komponent se bude zvětšovat (vířivé proudy se začnou generovat v hliníku, ubírají energii cívice a tato ztráta energie se projevuje jako odpor) a induktivní reaktance cívky se snižuje (magnetické pole vytvořené vířivými proudy působí proti magnetickému poli cívky – toto zeslabené magnetické pole určuje výslednou induktivní reaktanci). Jestliže se v materiálu nachází trhlina (klesne vodivost), vygeneruje se méně vířivých proudů, odpor se sníží a induktivní reaktance se naopak zvýší.

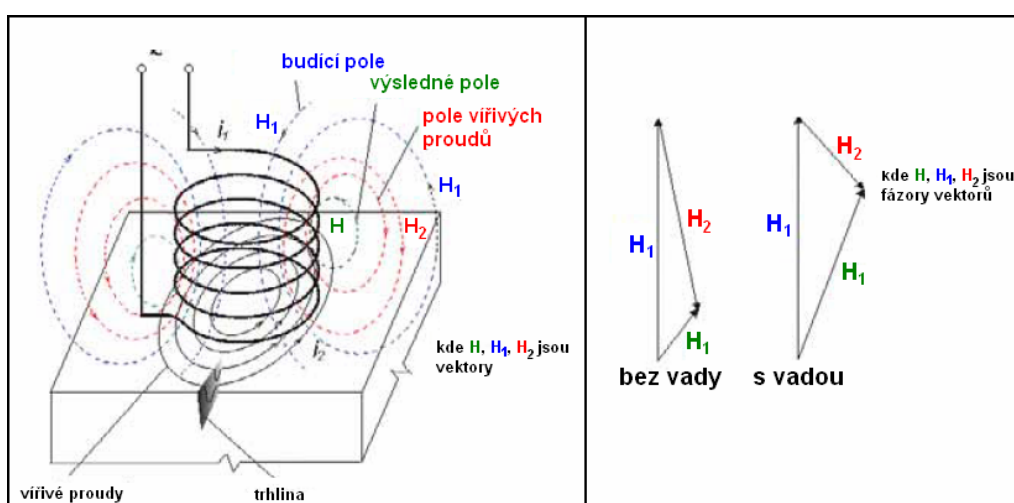
Pokud je sonda přiložena na magnetický vodivý materiál, jako např. ocel, stane se něco odlišného. Stejně jako u magnetického materiálu začnou vířivé proudy ubírat cívice energii a to se projeví vzrůstem odporu. A stejně jako u magnetických materiálů začnou vířivé proudy generovat své vlastní magnetické pole, které působí proti magnetickému poli cívky. Z impedančního diagramu je ale zřejmé, že induktivní reaktance se zvyšuje. To je způsobeno tím, že magnetická permeabilita ocele soustředí magnetické pole cívky. Zvýší se intenzita magnetického pole, které úplně zastíní magnetické pole vířivých proudů. Pokud se v nemagnetickém materiálu vyskytne trhlina, dojde k podobné změně ve výstupním signálu jako u magnetického materiálu. [2]

Hodnota činné ohmická složky (odpor) se získá po synchronní demodulaci signálu ze snímače. Jedná se v podstatě o demodulaci signálu ze snímače prováděná pomocí referenčního signálu, který je synchronní s budícím průběhem snímače. Reaktanční složka signálu snímače se získá kvadrurní demodulací. [9]

## 2.6 NDT metodou vířivých proudů

### 2.6.1 Detekce trhlin

- detekce trhlin ve vodivém materiálu je popsána v kapitole 3.6.



Obr. 10. Vliv defektu na výslednou intenzitu magnetického pole

### 2.6.2 Měření tloušťky tenkého materiálu

Pokud je sonda přiložena na vodivém materiálu, začnou se v něm generovat vířivé proudy. Čím je materiál slabší, tím méně se v něm generuje vířivých proudů – bude se zmenšovat odpor komponent. Na Obr.11. je pro nemagnetický materiál naznačen pohyb sondy z místa dotyku B do místa C a tomu odpovídající změna v impedančním diagramu. [4]

Maximální tloušťka materiálu  $t = 0,8 \cdot \delta$

### 2.6.3 Měření tloušťky povlaků na vodivých podkladech

Vířivé proudy umožňují zjišťovat tloušťku nevodivých povlaků na vodivém základním materiálu. Tato metoda je rozšířená zejména při měření polymerních povlaků a barev. [4]

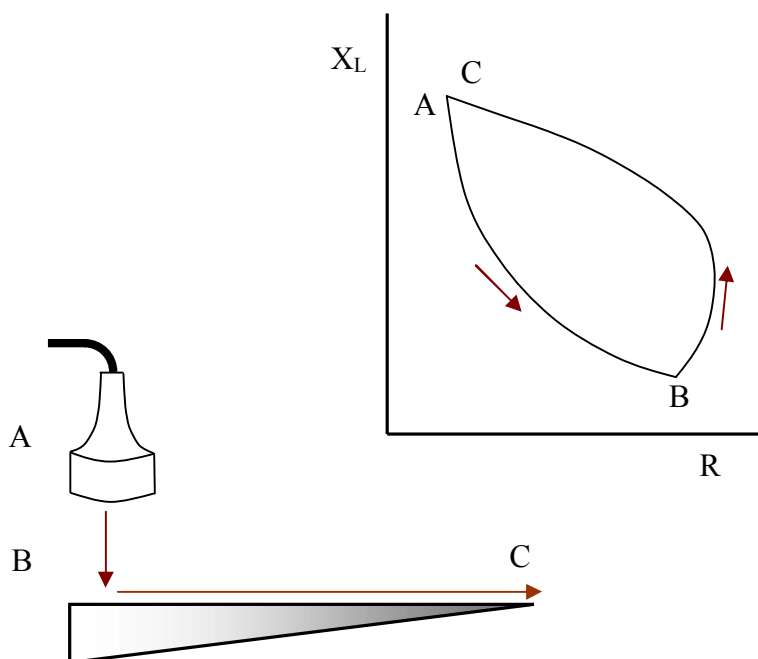
Vzdálenost cívky od vodivého materiálu ovlivní vzájemný indukční odpor okruhu. Vířivé proudy se soustředí blízko povrchu a jejich síla se snižuje s vzdáleností od cívky. Tloušťka povlaku udržuje cívku v určité vzdálenosti od povrchu. Ze vzájemného indukčního odporu tedy lze stanovit tloušťku povlaku.

Čím víc je sonda přibližována k podkladu (zmenšuje se tloušťka povlaku), tím méně vířivých proudů v podkladu vzniká, neboť magnetické pole cívky do něj méně zasahuje. Tloušťka povlaku mezi 0,5 a 25  $\mu\text{m}$  může být změřena s přesností 10 % pro silnější vrstvy a 4 % pro slabší vrstvy

Poměrně dobrých výsledků při měření tloušťky povlaků lze dosáhnout s běžným vířivoproudým detektorem trhlin a sadou kalibračních měrek.

Je také možné zjišťovat tloušťku vodivých nemagnetických vrstev na vodivém magnetickém základním materiálu, ale s přihlédnutím k odlišným vlastnostem materiálu (vodivosti a magnetické permeabilitě). V praxi se příliš často nepoužívá. K měření vodivých povlaků se spíše používá magnetoinдуктивní metoda [4].

Na Obr.11. je pro nemagnetický materiál naznačen pohyb sondy z místa A nad sondou až na dotyk s materiálem v místě B a tomu odpovídající změna v impedančním diagramu. [2]



Obr.11. Impedanční diagram pro nemagnetický materiál při oddálení sondy a změně tloušťky materiálu



### 2.6.4 Měření vodivosti

Změny ve vodivosti materiálu nám umožňují získat poznatky o jeho tepelném zpracování, chemickém složení a teplotě. Vířivé proudy nám tedy umožňují například třídit materiál podle elektrické vodivosti nebo nalézt oblast uvnitř materiálu, která byla tepelně ovlivněna.

Vířivoproudé přístroje pro měření vodivosti jsou často kalibrovány v jednotkách IACS (Percentage International Annealed Copper Standard). Tato jednotka porovnává vodivost čisté žíhané mědi (100% IACS) s ostatními materiály.

U neferomagnetických materiálů můžeme hodnotu vodivosti změřit. U feromagnetických materiálů nelze kvůli magnetické permeabilitě změřit hodnotu vodivosti, pouze jí můžeme porovnávat s referenčním etalonem. [4]



*Obr.12. Digitální a analogový přístroj k měření vodivosti metodou vířivých*

## 2.7 Fázové zpoždění

Fázové zpoždění je parametr signálu vířivých proudů, který umožňuje získat informace o hloubce defektu uvnitř materiálu. Fázové zpoždění je změna v době odezvy signálu vířivých proudů z trhliny na povrchu a z trhliny v určité hloubce pod povrchem.

Generování vířivých proudů může být chápáno jako časově závislý proces. To znamená, že vířivým proudům pod povrchem trvá zformování déle než těm na povrchu. Vyhodnocování fázového zpoždění výstupního signálu nám umožňuje odhadnout hloubku ve které se defekt nachází a se vhodným referenčním etalonem můžeme přibližně určit velikost defektu. [2]

$$\text{V radiánech: } \varphi = \frac{x}{\delta} \quad (16)$$

$$\text{Ve stupních} \quad \varphi = \frac{x}{\delta} \cdot 57,3 \quad (17)$$

kde:

$\varphi$	=	fázové zpoždění [rad nebo °]
$x$	=	hloubka pod povrchem [mm]
$\delta$	=	standardní hloubka penetrace [mm]

V jedné standardní hloubce penetrace je fázové zpoždění  $57^\circ$  neboli 1 radián. To znamená, že vířivé proudy v jedné standardní hloubce penetrace ( $\delta$ ) pod povrchem mají vůči vířivým proudům na povrchu fázové zpoždění  $57^\circ$ . Další hodnoty fázového zpoždění v závislosti na hloubce pod povrchem uvádí tabulka 3.

## 2.8. Měřicí přístroje

Základní měřicí přístroje obvykle obsahují generátor, zesilovač, demodulátor a zobrazovací jednotku. Může se jednat o přístroje analogové nebo digitální. K předním světovým výrobcům vířivoproudých přístrojů patří firmy HELMUT FISCHER GMBH+CO, DeFelsko, Hocking. Široká paleta přístrojů umožňuje univerzální použití přístrojů k měření vad a parametrů vodivých materiálů. Umožňují měření téměř všech v praxi používaných druhů povlaků na vodivých podkladech. Nezbytnou součástí měřicích přístrojů je měřicí sonda, která může být v přístroji vestavěná nebo oddělená. [10]



Obr.13. Vířivoproudé přístroje firmy DeFelsko pro měření povlaků

## 2.9. Měřicí sondy (snímače)

Snímač vířivých proudů je těleso obsahující budící a snímací prvky. Sondy jsou dostupné v široké škále tvarů a velikostí. Tyto sondy se liší především provozním režimem a uspořádáním zkušebních cívek, velikostí cívek, frekvencí a vnějším uspořádáním. Snímače mohou být se stíněním nebo bez. Stínění omezuje šíření elektromagnetického pole cívky v jejím okolí a to částečně nebo úplně. Sondy pro měření tloušťky musí mít dobrou mechanickou stabilitu při přitlačování na povrch povlaku. Proto se používají ploché pevné sondy nebo odpružené sondy – viz. Obr.16. [2, 4]

a) rozdělení podle uspořádání cívek

- **Absolutní snímače**– obvykle mají jednu zkušební cívku, která generuje vířivé proudy. Střídavý proud prochází cívkou a kolem cívky se generuje magnetické pole. Když je sonda umístěna do blízkosti vodivého materiálu, změny magnetického pole vytváří vířivé proudy uvnitř materiálu. Měřením absolutní změny v impedanci zkušební cívky získáme informace o zkoušeném materiálu. Budící cívka plní zároveň funkci snímací cívky. Samotný snímač nedefinuje druh měření.

Absolutní sondy mohou být použity pro odhalení vad materiálu, měření vodivosti a měření tloušťky materiálu. Jsou široce užívané kvůli své univerzálnosti. Absolutní sondy jsou citlivé zejména na změnu vodivosti, permeability a teploty.

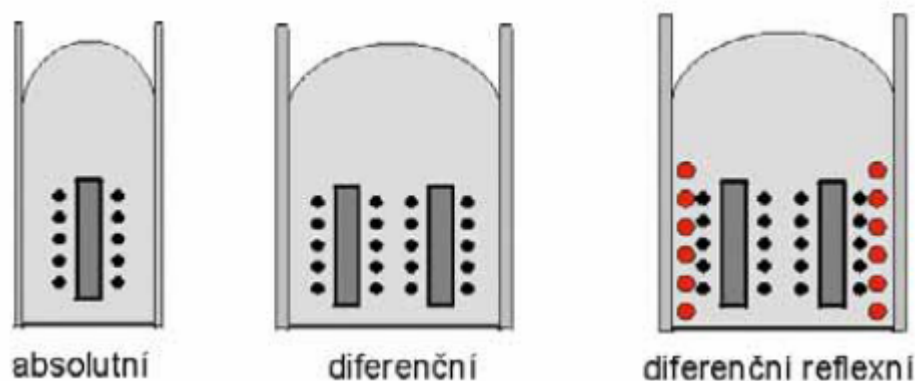
- **Diferenční snímače** – mají dvě činné cívky, které jsou obvykle vinuty v protifázi. Když jsou obě cívky nad oblastí zkušebního vzorku bez vad, není žádný rozdíl v signálech vyvolaných cívkami. Když se jedna cívka dostane nad defekt a druhá je nad materiálem bez vady, tak nastane rozdíl v signálech. Výhodou je velká citlivost na defekty a poměrně malá citlivost k pomalu proměnným veličinám jako například kolísání teploty. Nevýhodou použití diferenční sondy je, že může docházet k obtížnému vyhodnocování signálu. Pokud je například vada delší než vzdálenost mezi oběma cívkami, tak budou odhaleny pouze čelní a zadní hrany vady. Střed poruchy nebude odhalen, protože oba signály budou stejné. Samotný snímač nedefinuje druh měření.
- **Odrazové (reflexní) snímače** – mají dvě cívky podobně jako diferenční sondy, ale jedna cívka je užívána ke generování vířivých proudů a druhá je užívána k zaznamenávání změn ve zkoušeném materiálu. Výhoda odrazových sond je, že

primární cívka může být zhotovena tak, aby produkovala silné pole v nejbližším okolí indukční cívky. Indukční cívka může být nastavena na vysokou citlivost. Výroba těchto snímačů je náročnější a jsou proto poměrně drahé.

- **Hybridní snímače** – jsou kombinací předchozích typů snímačů. Používají se pro zvláštní účely.

#### b) rozdělení podle použití a tvaru

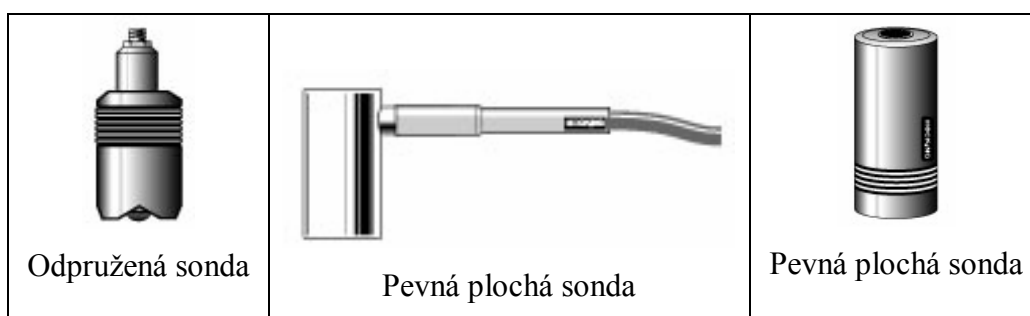
- **Příložné snímače** – jsou dostupné ve velké množství, různém rozsahu frekvencí a průměrů, se stíněnou nebo nestíněnou cívkou. Můžou se použít k měření tloušťky materiálu, ale i k měření vad, vodivosti a tloušťky povlakových vrstev.
- **Tužkové snímače** – jsou konstruovány pro vyšší frekvence a jsou tedy vhodnější zejména pro povrchové vady. Vyrábí se v absolutním, diferenčním nebo odrazovém provedení, jako stíněné nebo nestíněné.
- **Přenosné snímače na díry** – mají cívky uspořádány v pravém úhlu ke směru sondy a jsou dostupné s absolutním nebo diferenčním uspořádáním cívek v můstkovém provedení.
- **Prstencové sondy** – slouží pro testování tyčí a trubek. Cívka obklopuje testovaný předmět



Obr.14.Konstrukční uspořádání snímačů



Obr.15. Různé provedení sond



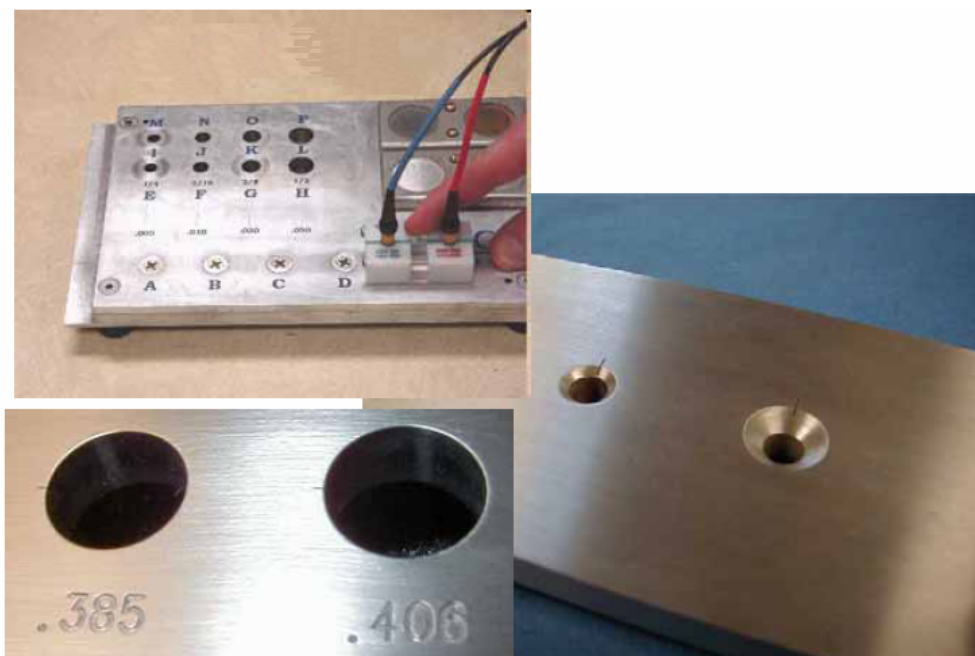
Obr.16. Odpružené a pevné sondy

## 2.10. Referenční etalony

Použití referenčních etalonů při testování metodou vířivých proudů je velmi důležité, neboť výstupní signál měřících zařízení může být ovlivněn mnoha okolnostmi a vlivy. Nепatrná změna v nastavení přístroje může způsobit drastické zkreslení výstupního signálu. Stejně jako ve většině NDT metodách dosahujeme nejlepších výsledků, pokud porovnáváme výsledky neznámého zkoušeného předmětu s výsledky z měření předmětu s dobře známými vlastnostmi a vadami. Téměř ve všech případech je nutné zkušební zařízení seřadit pomocí referenčních etalonů.

Při zjišťování trhlin, ztenčování materiálu vlivem koroze, měření tloušťky povlaků a další měření, slouží referenční etalony k nastavení zařízení tak, aby výstupem byl rozpoznatelný signál. V mnoha případech se porovnává výstupní signál se signálem zjištěným při měření známého defektu v referenčním etalonu.

Referenční etalon by měl být ze stejného materiálu jako zkoušený předmět. Pokud to není možné, měl by být z materiálu se stejnou vodivostí a magnetickou permeabilitou. [2]



*Obr.17. Referenční etalony*

## **2.11. Přehled norem EN týkajících se vířivých proudů**

- EN 12084 Zkoušení vířivými proudy - Všeobecné zásady a směrnice
- EN 1330-5 Terminologie - Část 5 : Termíny používané při zkoušení vířivými proudy
- EN 13860-1 Vířivé proudy - Zařízení - Část 1 : Charakteristiky a ověření přístroje
- EN 13860-2 Vířivé proudy - Zařízení - Část 2 : Charakteristiky a ověření sondy
- EN 13860-3 Vířivé proudy - Zařízení - Část 3 : Charakteristiky a ověření systému

## 3 Praktická část

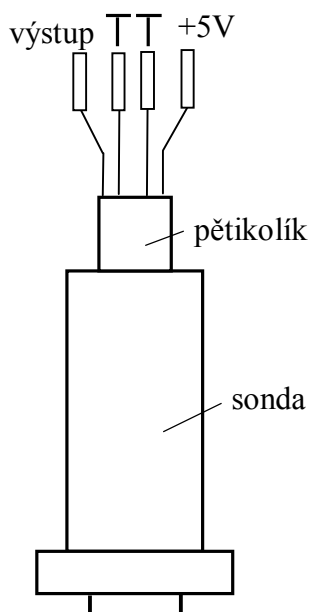
### 3.1 Úvod

V rámci praktické části bylo realizováno funkční zapojení vířivoproudého snímače a byl specifikován okruh jeho použití k měření povlaků. Z naměřených výsledků byla stanovena funkční závislost tloušťky povlaku na výstupním napětí snímače.

### 3.2 Přehled použitých přístrojů a pomůcek

#### 3.2.1 Diagnostický snímač (sonda)

Jedná se vířivoproudou sondu firmou STARMANS bez bližšího určení. Dle propagačních materiálů firmy STARMANS má sonda rozlišení  $1\mu\text{m}$ . Sonda je napájena stejnosměrným napětím 5V, s proudovým odběrem 10mA. Výstupním signálem sondy je stejnosměrné napětí (max.25V), které se měří na výstupních konektorech pomocí voltmetru.

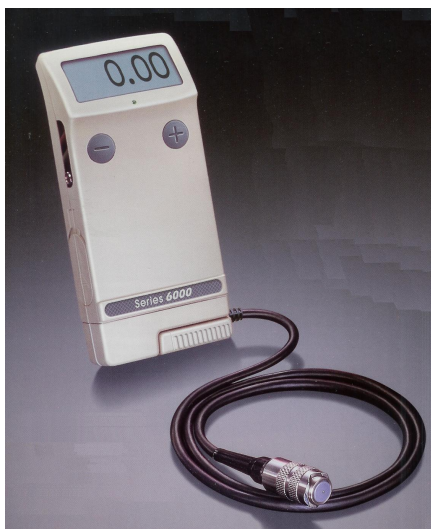


Obr.18. Schéma diagnostické sondy

### 3.2.2 Positector 6000FNS1

Jedná se o ruční elektronické měřidlo firmy DeFelsko na měření tloušťky povlaků na kovech nedestruktivně, rychle a přesně, které využívá k měření metody magnetické indukce a metody vířivých proudů.

Tento model se vyznačuje automatickou volbou měřicí metody podle typu podkladu, okamžitou automatickou kalibrací a jednoduchým nastavením podle známé tloušťky. Předností je řada funkcí pro pohodlné měření a vyhodnocení, odolnost proti prachu, vlhkosti, kyselinám, rozpouštědlům a olejům. Sonda je oddělená pro lepší přístup k měřeným místům [11].



*Obr.19. Positector 6000*

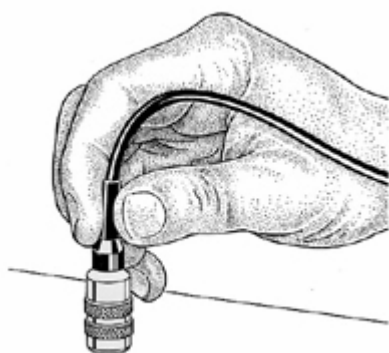
### 3.2.3 Sonda FN

Tento typ sondy je určen k použití s přístrojem Positector 6000. Sonda je díky safírové dotykové ploše odolná proti opotřebení. Sondy FN jsou kombinací možností sondy pro feromagnetické i neferomagnetické materiály. Pokud je povlak vodivý nemagnetický, v rámci tloušťkového podkladu sondy a podkladový kov je feromagnetický, sonda k jeho změření použije magneticko-indukční metodu měření. Při měření sonda zkusí nejprve magneticko-indukční metodu měření. Pokud se tímto postupem nedosáhne platného měření, přístroj se automaticky přepne na měření metodou vířivých proudů, které se využívá pokud je povlak nevodivý, v rámci tloušťkového rozsahu sondy a podklad je neferomagnetický. Metodu vířivých proudů lze u tohoto přístroje použít i pro měření na mírně magnetických podkladech, např. čirý povlak na pozlacené niklované mosazi. Při měření oddělnou sondou je třeba pro získání přesných výsledků zajistit správné držení sondy – viz. Obr.21. [11].

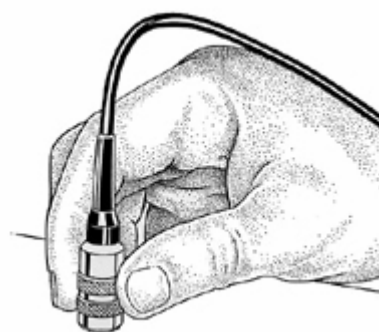


Tab.4. Technické parametry sondy FN

Rozsah	0 ÷ 1500 µm	
Standardní rozlišení	1 µm	
	2 µm (> 50 µm)	
Přesnost	± (1 µm)	0 ÷ 50 µm
	± (2 µm)	> 50 µm
Konstantní přítlak sondy	100g	



Obr.20. Chybné držení sondy



Obr.21. Správné držení sondy

### 3.2.4 Plastové měrky

Součástí přístroje Positector 6000 je i sada kalibračních plastových měrek. Slouží k ověření, že měřicí přístroj měří ve své toleranci a nevyžaduje další kalibrační nastavení. Nastavení, nebo kalibrační nastavení je provedení změn přístrojem naměřené tloušťky tak, aby bylo dosaženo souhlasu se známým vzorkem za účelem zlepšení účinnosti přístroje na konkrétní povrch nebo v určité části jeho měřicího rozsahu. U seřízení těchto přístrojů se většinou provádí jednobodové nebo dvoubodové kalibrační nastavení. Pro většinu aplikací není nutno nic nastavovat –



Obr.20. Plastové měrky

jen vynulovat na nepovlakovaném materiálu.

Jednotlivá měření však mohou být ovlivněna změnami tvaru, poloměru, složení podkladového materiálu, drsností povrchu nebo měřením na různých místech. Pro tyto aplikace je vhodné provést nastavení. Moderní přístroje si dokáží v paměti uchovat kalibrační nastavení pro různé povrchy. Proto není třeba při opakovaném měření znovu provádět kalibraci, ale jen ji vyvolat z paměti. Tyto měrky posloužili pro kalibrační nastavení diagnostické sondy [11].

*Tab.5. Tloušťka plastových měrek*

Barva	Tloušťka [μm]
<b>Žlutá</b>	<b>508 ± 5%</b>
<b>Hnědá</b>	<b>254 ± 5%</b>
<b>Modrá</b>	<b>127 ± 5%</b>
<b>Červená</b>	<b>50,8 ± 10%</b>
<b>Oranžová</b>	<b>25,4 ± 20%</b>

### 3.2.5 Metex M-4650

Digitální multimetr Metex M-4650 slouží v zapojení vířivoproudého snímače jako zobrazovací jednotka výstupního stejnosměrného napětí snímače [12].



*Obr.21. Metex M-4650*

Tab.6.Technické parametry multimetru Metex-4650 pro stejnosměrné napětí

Rozsah	Rozlišení	Přesnost
2 V	0,1 mV	$\pm 0,05\% + 3$ čísla
20 V	1 mV	$\pm 0,05\% + 3$ čísla
200 V	10 mV	$\pm 0,05\% + 3$ čísla

### 3.3 Funkční zapojení vířivouproudého snímače

#### 3.3.1 Zapojení snímače se síťovým adaptérem

Tohoto zapojení může být použito pokud se měření povlaků provádí v dosahu rozvodné sítě nebo pokud nevádí omezená délka napájecího kabelu. Sonda je připojena na síťový napájecí zdroj, který poskytuje napětí 5V stejnosměrné, 10mA. Stejnosměrné napětí na výstupních svorkách je měřeno pomocí digitálního multimetru Metex M-4650. Zapojení je zřejmé z Obr.22.



Obr.22. Zapojení se síťovým adaptérem

### 3.3.2 Zapojení snímače s napájecím modulem

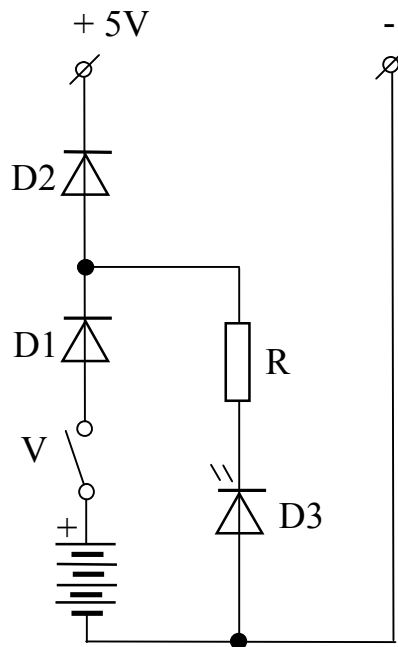
Pokud je vyžadováno přenosné zařízení pro měření tloušťky povlaků nebo pokud v dosahu měřeného předmětu není k dispozici rozvodná síť, lze použít bateriové napájení. Dle požadavků na napájení sondy (5V, 10mA) byl sestaven samostatný napájecí modul (viz.Obr.23.) na čtyři baterie typu R6 Mignon. Konstrukční uspořádání modulu je na Obr.24. Zapojení sondy je stejné jako v bodě 3.3.1, jen místo síťového adaptéru je použit napájecí modul, který poskytuje stejnosměrné napětí 5V.

Seznam použitých součástek při konstrukci modulu:

- D1 ... dioda KY130/80
- D2 ... dioda KY130/80
- D3 ... svítivá dioda LQ 1131
- R ..... rezistor 180 $\Omega$ /0,25W
- V ..... vypínač P-C1400AB01
- 4 x baterie R6 MIGNON 1,5V



Obr.23. Zapojení s napájecím modulem



Obr.24. Schéma zapojení napájecího modulu

### 3.4 Kalibrace diagnostického snímače pro měření nevodivých povlaků

#### 3.4.1 Postup měření

Při měření byl použit jako podkladový kov hliník, ocel 11 110, aluminut a litina 42 2410. Na každém z těchto materiálů byla změřena tloušťka měrek dodávaných s přístrojem Positector 6000. Tímto přístrojem byla změřena tloušťka měrek po přiložení na třech různých místech podkladového kovu a takto naměřená hodnota byla zprůměrována. Takto naměřená tloušťka měrky posloužila pro vyhodnocení kalibrační závislosti  $L = f(U)$ . Měrky byly dále na podkladovém kovu změřeny diagnostickým snímačem, jehož výstupní hodnotou je napětí  $U$ . Pro orientační kontrolu byly měrky změřeny mikrometrem.

#### 3.4.2 Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty tloušťky povlaku v závislosti na podkladovém kovu jsou uvedeny v Tab.7 až Tab.10.

Tab.7.

Podkladový kov: Al						
Měrka	Tloušťka měrky, $L$ [ $\mu\text{m}$ ]				Napětí na voltmetru [V]	
	Positector 6000				Mikrometr	Diagnostická sonda
	č.1	č.2	č.3	průměr	-	-
-	0	0	0	0	-	7,030
Oranžová	23	23	22	22,66	25	7,215
Červená	52	56	56	54,66	55	7,478
Modrá	134	132	128	131,33	135	8,144
Hnědá	274	272	272	272,6	270	9,504
Žlutá	504	506	502	504	505	11,923
Žlutá+Hnědá	775	777	777	776,66	775	14,421

Tab.8.

Podkladový kov: 11 110						
Měrka	Tloušťka měrky, L [ $\mu\text{m}$ ]					Napětí na voltmetru [V]
	Positector 6000				Mikrometr	Diagnostická sonda
	č.1	č.2	č.3	průměr	-	-
-	0	0	0	0	-	9,889
Oranžová	23	22	23	22,66	25	10,029
Červená	50	54	52	52	55	10,242
Modrá	128	130	126	128	135	10,734
Hnědá	274	272	276	274	270	11,679
Žlutá	510	508	512	510	505	13,278
Žlutá+Hnědá	778	777	778	777,66	775	15,000

Tab.9

Podkladový kov: aluminít						
Měrka	Tloušťka měrky, L [ $\mu\text{m}$ ]					Napětí na voltmetru [V]
	Positector 6000				Mikrometr	Diagnostická sonda
	č.1	č.2	č.3	průměr	-	-
-	0	0	0	0	-	9,972
Oranžová	23	24	24	23,66	25	9,974
Červená	50	52	52	51,33	55	10,292
Modrá	128	128	128	128	135	10,906
Hnědá	270	272	270	270,66	270	12,067
Žlutá	502	504	502	502,66	505	13,871
Žlutá+Hnědá	777	775	777	776,6	775	15,945

Tab.10.

Podkladový kov: 42 2410						
Měrka	Tloušťka měrky, L [ $\mu\text{m}$ ]					Napětí na voltmetru [V]
	Positector 6000				Mikrometr	Diagnostická sonda
	č.1	č.2	č.3	průměr	-	-
-	0	0	0	0	-	11,815
Oranžová	23	22	23	22,66	25	11,966
Červená	54	54	52	52,33	55	12,196
Modrá	130	132	132	131,33	135	12,714
Hnědá	272	278	270	273,33	270	13,663
Žlutá	508	510	508	508,66	505	15,250
Žlutá+Hnědá	775	777	777	776,6	775	17,002

### 3.4.3 Vyhodnocení naměřených hodnot

Z naměřených hodnot v Tab.7. až Tab.10. byl vypracován Graf č.1. Z grafu vyplývá, že kalibrační závislosti  $L = f(U)$  je lineární. Funkční závislost tloušťky povlaku na výstupním napětí snímače pro dané podkladové materiály je uvedena v Tab.11

### 3.4.4 Postup při měření nevodivých povlaků diagnostickým snímačem

1. provést měření na podkladovém kovu s přiloženou měrkou o známé tloušťce  $\rightarrow$  tloušťka měrky  $L_1$ ; napětí na voltmetru  $U_1$
2. provést měření na podkladovém kovu s přiloženou druhou měrkou o známé tloušťce  $\rightarrow$  tloušťka měrky  $L_2$ ; napětí na voltmetru  $U_2$

pozn.: Rozdíl tloušťky měrek by měl být největší možný. Doporučený rozdíl je alespoň  $100\mu\text{m}$ . První měření lze provést bez měrky na dotyk s podkladovým vodivým materiálem  $\rightarrow U_1; L_1=0$

3. určit rovnici přímky pro závislost  $L = f(U)$

$$L = U \cdot A + B \quad [\mu\text{m}; \text{V}; \mu\text{m} \cdot \text{V}^{-1}; \mu\text{m}] \quad (18)$$

kde  $U$  ... napětí na voltmetru

$A, B$  ... konstanty závislé na použitých měrkách a materiálu

$$A = \frac{L_2 - L_1}{U_2 - U_1} \quad (19)$$

$$B = \frac{U_2 \cdot L_1 - U_1 \cdot L_2}{U_2 - U_1} \quad (20)$$

kde:  $L_1$  ... tloušťka první měrky [ $\mu\text{m}$ ]

$L_2$  ... tloušťka druhé měrky [ $\mu\text{m}$ ]

$U_1$  ... napětí na voltmetru při měření první měrky [V]

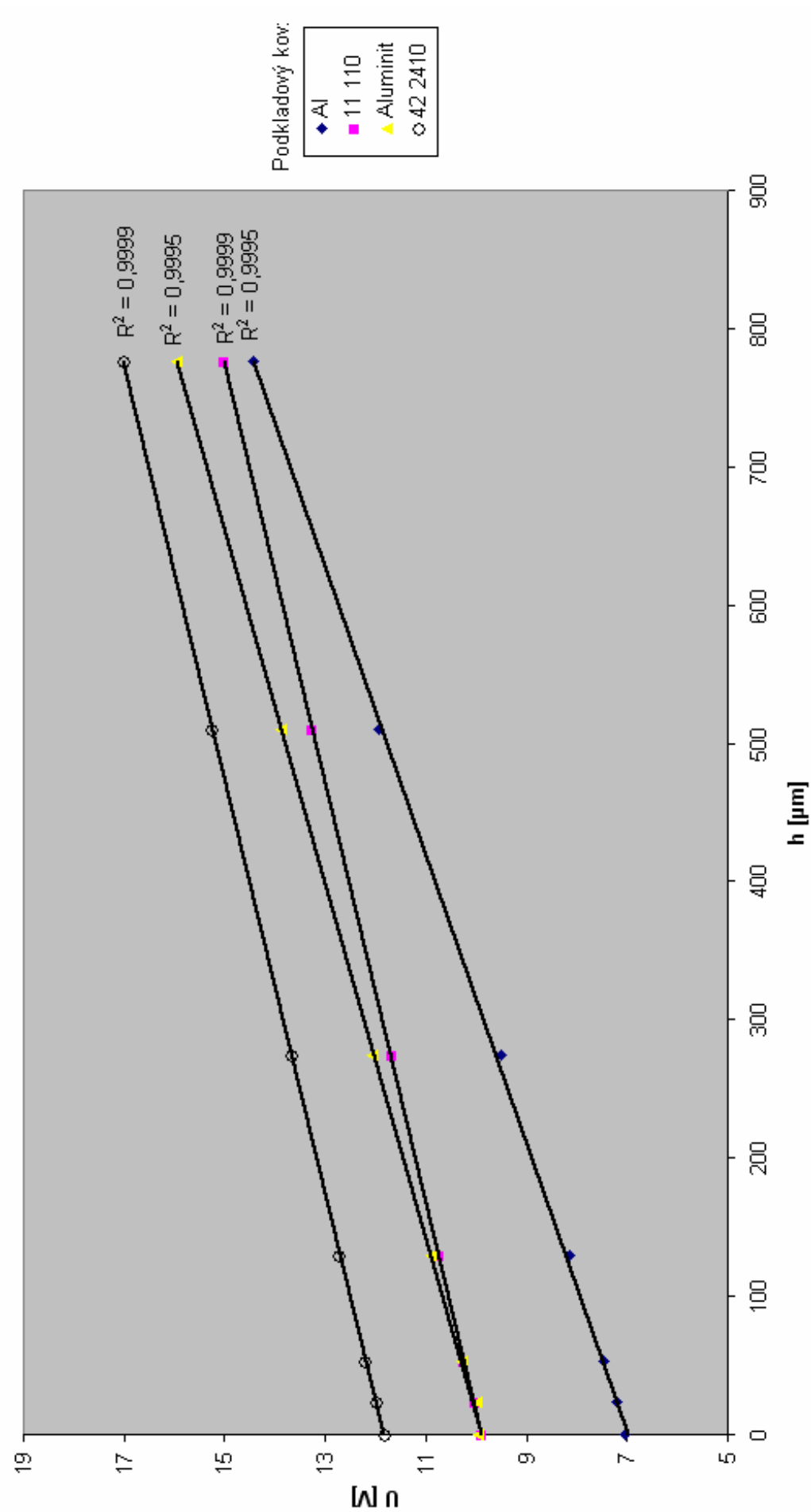
$U_2$  ... napětí na voltmetru při měření druhé měrky [V]

Tab.11. Funkční závislost  $L = f(U)$  pro nevodivé povlaky

Podkladový materiál	Závislost $L = f(U)$
Al	$L = 104,166 \cdot U - 725,520$
Ocel 11 110	$L = 151,512 \cdot U - 1497,4697$
Aluminit	$L = 128,205 \cdot U - 1268,244$
Litina 42 2410	$L = 149,254 \cdot U - 1765,522$



Graf č.1. Závislost tloušťky nevodivých povlaků na výstupním napětí diagnostického snímače



## 3.5 Kalibrace sondy pro měření vodivých povlaků

### 3.5.1 Postup měření

Při měření byl použit jako podkladový kov ocel 11 110, aluminat a litina 42 2410. Na každém z těchto materiálů byla změřena tloušťka Al plechů přístrojem Positector 6000. Tímto přístrojem byla změřena tloušťka plechů po přiložení na třech různých místech podkladového kovu a takto naměřená hodnota byla zprůměrována. Naměřená tloušťka plechů posloužila pro vyhodnocení kalibrační závislosti  $L = f(U)$ . Plechy byly dále na podkladovém kovu změřeny diagnostickým snímačem, jehož výstupní hodnotou je napětí  $U$ . Pro orientační kontrolu byly plechy změřeny mikrometrem. Metodou vířivých proudů nelze měřit neferomagnetický povlak na neferomagnetickém vodivém materiálu, proto nebylo měřeno na hliníku.

### 3.5.2 Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty tloušťky povlaku v závislosti na podkladovém kovu jsou uvedeny v Tab.12 až Tab.14.

Tab.12.

Podkladový kov: 11 110						
Al plech	Tloušťka plechu, L [ $\mu\text{m}$ ]					Napětí na voltmetru [V]
	Positector 6000				Mikrometr	Diagnostická sonda
	č.1	č.2	č.3	průměr	-	-
-	0	0	0	0	-	9,850
č.1	10	10	10	10	10	6,120
č.2	12	13	12	12,33	10	5,706
č.3	11	11	12	11,33	10	4,963
č.4	76	76	74	75,33	75	6,649
č.5	98	100	100	99,33	100	6,655
č.6	102	102	102	102	100	6,810
č.7	350	352	351	351	350	6,920
č.8	562	572	564	566	550	6,988
č.9	646	648	646	646,66	630	6,980
č.10	710	708	708	708,66	710	6,996
č.11	948	950	955	951	940	6,992

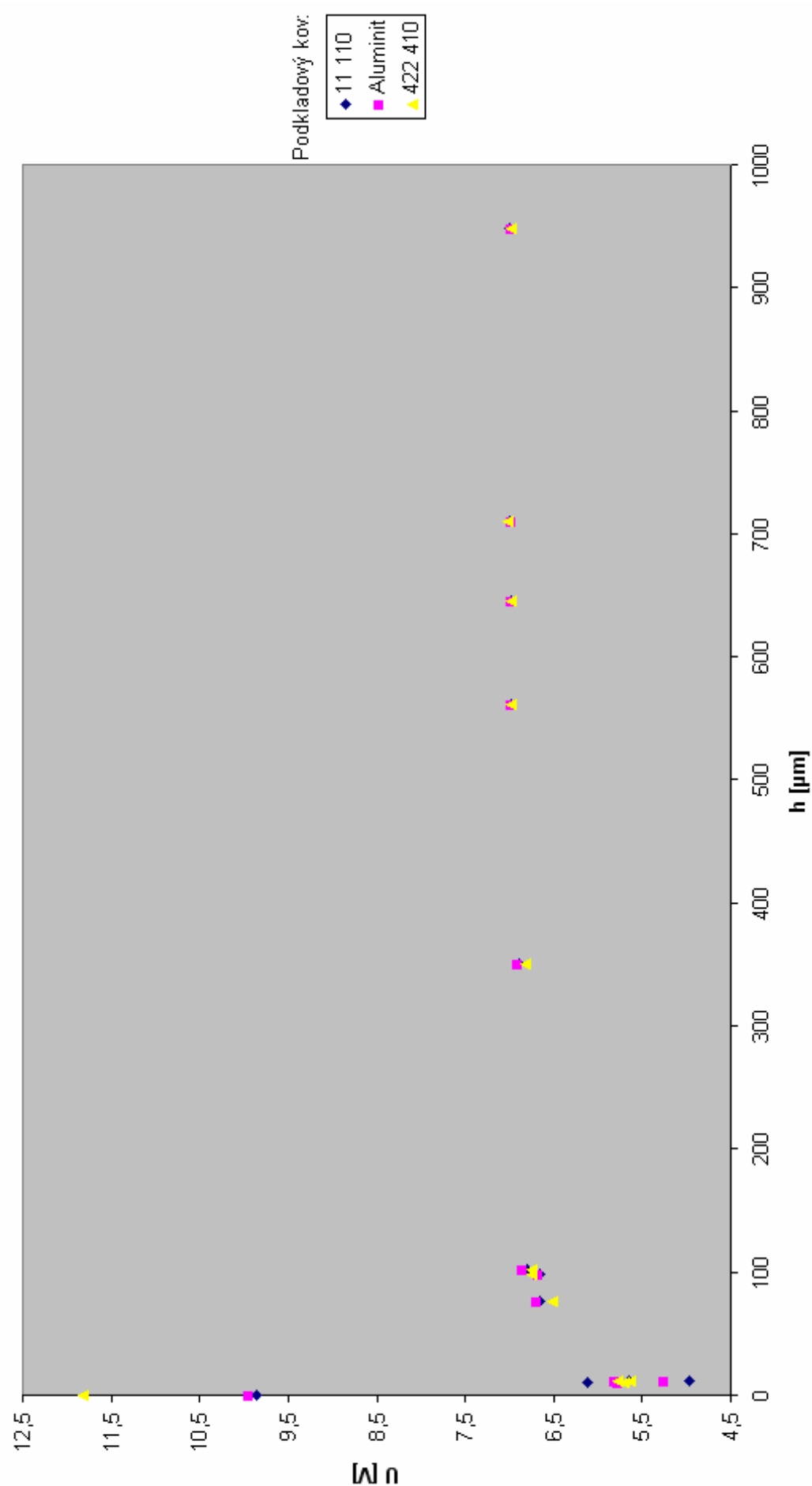
Tab.13

Podkladový kov: Aluminīt						
Al plech	Tloušťka plechu, L [μm]					Napětí na voltmetru [V]
	Positector 6000				Mikrometr	Diagnostická sonda
	č.1	č.2	č.3	průměr	-	-
-	0	0	0	0	-	9,947
č.1	10	10	10	10	10	5,775
č.2	12	13	12	12,33	10	5,815
č.3	11	11	12	11,33	10	5,251
č.4	76	76	76	76	75	6,686
č.5	104	102	104	103,33	100	6,672
č.6	104	102	102	102,66	100	6,862
č.7	352	355	356	354,33	350	6,978
č.8	560	562	560	560,66	550	6,980
č.9	636	636	632	634,66	630	6,988
č.10	718	716	718	717,33	710	6,987
č.11	1102	1130	1116	1116	940	6,982

Tab.14

Podkladový kov: 42 2410						
Al plech	Tloušťka plechu, L [μm]					Napětí na voltmetru [V]
	Positector 6000				Mikrometr	Diagnostická sonda
	č.1	č.2	č.3	průměr	-	-
-	0	0	0	0	-	11,819
č.1	11	12	11	11,33	10	5,697
č.2	14	15	15	14,66	10	5,768
č.3	13	13	13	13	10	5,631
č.4	74	74	76	74,66	75	6,515
č.5	98	100	104	100,66	100	6,750
č.6	100	102	102	101,33	100	6,756
č.7	350	348	352	350	350	6,972
č.8	580	584	580	581,33	550	6,973
č.9	638	638	632	636	630	6,978
č.10	726	724	720	723,33	710	7,010
č.11	1038	1032	1030	1033,3	940	6,985

Graf č.2. Závislost tloušťky vodivých povlaků na výstupním napětí diagnostického snímače



### 3.5.3 Vyhodnocení naměřených hodnot

Z naměřených hodnot v Tab.12. až Tab.14. byl vypracován Graf č.2. Z grafu vyplývá, že kalibrační závislosti  $L = f(U)$  není vhodná pro praktické měření vodivých povlaků. Zhruba do tloušťky povlaku  $50\mu\text{m}$  je charakteristika velmi strmá a pro praxi nepoužitelná, od  $120\mu\text{m}$  není patrná téměř žádná závislost výstupního napětí na tloušťce povlaku.

## 4 Diskuze

Předmětem bakalářské práce byla realizace funkčního zapojení diagnostického vířivoproudého snímače (sondy) firmy STARMANS, vyhodnocení možnosti jeho použití a vypracování kalibračního nastavení pro praktické použití při měření tloušťky vodivých a nevodivých povlaků na feromagnetických a neferomagnetických vodivých podkladech. Sonda byla získána Technikou univerzitou v Liberci od firmy STARMANS po ukončení výroby vířivoproudých tloušťkoměrů. Kromě popisu zapojení byla sonda dodána bez jakéhokoli označení, popisu použití a technických specifikací. Z dostupných reklamních materiálů firmy STARMANS je zřejmé, že sonda byla původně součástí tloušťkoměru DIO-572.

Bylo realizováno nejjednodušší funkční zapojení snímače. Snímač je napájen stejnosměrným napětím 5V, výstupním signálem je stejnosměrné napětí  $0\div 25\text{V}$ . Jako napěťový zdroj posloužil síťový adaptér 5V, 10mA. Nevýhodou tohoto zapojení byla omezená délka přívodního kabelu k síťovému adaptéru, která by mohla být v praktickém měření na obtíž. Proto byla realizována možnost zapojení s přenosným napájecím modulem na čtyři baterie typu R6 Mignon. Pro stabilní hodnotu napětí napájecího modul byly při jeho konstrukci místo rezistorů použity usměrňovací diody, neboť hodnota jejich odporu není závislá na teplotě.

Jako zobrazovací jednotka výstupního napětí snímače byl použit digitální multimetr Metex M-4650. Při měření může být použit libovolný přesný voltmetr, ale jako nejvhodnější se doporučuje voltmetr digitální s  $3\frac{1}{2}$  místným displejem. Rozsah voltmetru je dostačující do 25V.

Kalibrační nastavení diagnostického snímače pro měření **nevodivých povlaků** bylo provedeno pomocí plastových měrek dodávaných s vířivoproudým tloušťkoměrem Positector 6000. Při kalibraci se vycházelo z tloušťky měrek naměřených tímto přístrojem a výstupního napětí diagnostického snímače. Přístrojem Positector bylo

zjištěno, že tloušťka „hnědé“ kalibrační měrky firmy DeFelsko dodávané s přístrojem nesplňuje výrobcem udávanou hodnotu  $254\mu\text{m} \pm 5\%$ . Skutečná průměrná hodnota této měrky je  $270\mu\text{m}$ . Při kalibračním nastavení je tedy nutno uvažovat hodnotu naměřenou. Z grafu č.1. je zřejmé, že kalibrační závislost  $L = f(U)$  je lineární s vysokým koeficientem spolehlivosti  $R^2$  blízkému se hodnotě 1. Z toho vyplývá, že diagnostický snímač je možné s vysokou přesností použít k měření nevodivých povlaků na feromagnetických i neferomagnetických vodivých podkladech. Lineární závislost byla ověřena až do tloušťky povlaku 1mm. Pro praktické měření je vhodné sestavit rovnice přímek kalibrační závislosti  $L = f(U)$  pro nejčastěji používané materiály (viz.3.4.4). Přesnost měření závisí především na drsnosti povrchu podkladového materiálu, správném držení sondy a správném určení kalibrační závislosti pro daný podkladový materiál.

Kalibrační nastavení diagnostického snímače pro měření vodivých povlaků bylo provedeno pomocí hliníkových plechů. Z grafu č.2. je zřejmé, že kalibrační závislost  $L = f(U)$  není vhodná pro praktické měření vodivých povlaků. Zhruba do tloušťky povlaku  $50\mu\text{m}$  je charakteristika velmi strmá a pro praxi nepoužitelná, od  $120\mu\text{m}$  není patrná téměř žádná závislost výstupního napětí na tloušťce povlaku. Je to zřejmě způsobeno konstrukčním uspořádáním diagnostické sondy, která je seřízena pro měření nevodivých povlaků. K dispozici také nebyly hliníkové plechy se zaručeným stejným složením. K nepřesnostem v naměřených hodnotách také zřejmě došlo vlivem nedokonalého přilnutí hliníkového plechu k podkladovému materiálu. Metoda vířivých proudů se pro měření vodivých povlaků v praxi příliš nepoužívá. Přístroj Positector 6000 se sondou FN používá metodu vířivých proudů pouze pro nevodivé povlaky, k měření vodivých povlaků používá magnetoinдуктивní metodu.

## 5 Závěr

V rámci této bakalářce bylo provedeno:

- seznámení se základy nedestruktivního testování materiálu
- seznámení s testováním materiálu metodou vířivých proudů
- vysvětlení principu měření vad, vodivosti a tloušťky vrstev metodou vířivých proudů.
- funkční zapojení vířivouproudého diagnostického snímače
- určena kalibrační závislosti tloušťky povlaku na výstupním napětí snímače

Bylo zjištěno:

- Diagnostický vířivoproudý snímač je **vhodný k měření nevodivých povlaků** na feromagnetických a neferomagnetických vodivých podkladech s vysokou přesností.
- Diagnostický vířivoproudý snímač **není vhodný k měření vodivých povlaků** na feromagnetických a neferomagnetických vodivých podkladech s vysokou přesností.

## 6 Použitá literatura

- [1] <<http://www.gammalux.cz/>>, [5.1.2006]
- [2] <<http://www.ndt-ed.org/>>, [1.2.2006]
- [3] <<http://www.geocities.com/raobpc/EC-Def.html>> [9.2.2006]
- [4] <<http://www.hocking.com/>>, [12.4.2006]
- [5] <<http://www.automa.cz/elektro/2005/el0405103.htm>>, [20.1.2006]
- [6] Tkotz, K. a kol., *Příručka pro elektrotechniku*, Praha: nakl.Europa-Sobotáles, 2002
- [8] <<http://www.converter.cz/tabulky/relativni-permeabilita.htm>>, [4.4.2006]
- [9] Norma ČSN EN 1330-5 „Nedestruktivní zkoušení - Terminologie - Část 5: Termíny používané při zkoušení vířivými proudy“, únor 2000
- [10] <<http://www.defelsko.com/>>, [12.3.2006]
- [11] Uživatelská příručka Positector 6000; český překlad, 2005
- [12] Uživatelská příručka Metex M-4650; 2003
- [13] Propagační materiály fa STARMANS